

Anni Keskisimonen

Huokostamistapojen vaikutus betonin ominaisuuksiin

Opinnäytetyö
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Rakennusinsinööri

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Anni Keskisimonen	Rakennusinsinööri (AMK)	Toukokuu 2020
Opinnäytetyön nimi Huokostamistapojen vaikutus betonin ominaisuuksiin		38 sivua 4 liitesivua
Toimeksiantaja Tuomo Kovanen, Lujabetoni Oy Petri Manninen, Ab Sika Oy		
Ohjaaja Sirpa Laakso, XAMK Oy Anna Eskola, KymiLabs		
Tiivistelmä Tutkimuksen tarkoitus oli selvittää kahden uudenlaisen huokostavan lisäaineen vaikutuksia betonin lujuuteen sekä säänkestävyyteen. Tutkimukset ja valut on suoritettu laboratorio-olosuhteissa. Vertailukohtana tutkimuksessa käytettiin jo markkinoilla olevaa huokostinta ja ilman huokostinta tehtyjä koekappaleita sekä näiden tuloksia. Käytetyt huokostimet olivat toimintaperiaatteeltaan toisistaan todella poikkeavia. Mukana oli mekaaninen, kemiallinen sekä veden pintajännitykseen perustuva huokostin. Jokaisesta betonierästä valettiin tutkimusta varten 8 koekappaleita ja lisäksi tämän tutkimuksen ulkopuolelta mukaan tutkimukseen on saatu tulokset ilman huokostinta valetusta erästä. Koekappaleille on tuoreenmassan testien lisäksi laboratorio-olosuhteissa tehty suora pakkaskoe sekä huokosjakoanalyysi ja betonin valmistajan tehtaalla on testattu puristuslujuus. Kaikki huokostimet täyttivät sallitut raja-arvot kaikissa kokeissa lukuun ottamatta SikaControl AER-200 P:tä sekä SikaAir-PRO V5, joiden puristuslujuuden arvot ovat 1...2 MPa alle 30 MPa tavoitearvon.		
Asiasanat betoni, ilmamäärä, pakkasenkestävyys, puristuslujuus		

Author (authors)	Degree	Time
Anni Keskisimonen	Bachelor of Engineering	May 2020
Thesis title		38 pages 4 pages of appendices
Effect of air-entraining on the properties of concrete		
Commissioned by		
Tuomo Kovanen, Lujabetoni Oy Petri Manninen, Ab Sika Oy		
Supervisor		
Sirpa Laakso, XAMK Anna Eskola, KymiLabs Oy		
Abstract		
<p>The purpose of this thesis was to study the effects of two new types of air-entraining admixtures on the compressive strength and weather resistance of concrete. All the studies and concrete casts have been performed under laboratory conditions. An admixture that is already on the market and results from tests of concrete without air-entraining admixture has been chosen as a reference.</p> <p>All the air-entraining mixtures were different from each other by their texture and principles of affecting concrete. Mechanical, chemical and surface tension-based admixtures were included in the study. Eight specimens were cast from each concrete mixture and in addition, results of specimens without air-entraining admixture were gotten outside the scope of this study.</p> <p>Freeze-thaw resistance test and air void analysing for test specimens were made in a laboratory condition. Compressive strength was tested at the concrete manufacturer's factory.</p> <p>All the air-entraining mixtures were within the limits in all tests except SikaControl AER-200 P and Sika Air-PRO V5 which have compressive strength values of 1...2 MPa below 30 MPa target value.</p>		
Keywords		
concrete, air content, freeze-thaw resistance, compressive strength		

SISÄLLYS

KÄSITTEET	6
1 JOHDANTO	6
2 TUTKIMUKSEN TAUSTAT	7
2.1 Huokostavien lisäaineiden vaikutus betoniin -tutkimus.....	8
2.2 Robust Air -tutkimus	9
3 TUTKIMUSSUUNNITELMA	9
4 BETONI.....	11
5 PAKKASRASITUS	12
6 BETONIN ILMAMÄÄRÄ JA SUOJAHUOKOSET	13
7 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTY BETONI SEKÄ HUOKOSTIMET	15
7.1 Massan koostumus	15
7.2 Huokostimet	16
7.2.1 SikaAir-PRO V5.....	16
7.2.2 SikaControl® AER-200 P	17
7.2.3 SikaAer® Solid	19
8 KOKEET JA LABORAATIOT	19
8.1 Ilmamäärämittaus ja AVA-mittaus	19
8.2 Puristuslujuus.....	22
8.3 Suora pakkaskoe.....	23
8.4 Huokosjakoanalyysi.....	26
9 TULOSTEN ANALYSOINTI	26
9.1 Huokosjakoanalyysi.....	26
9.2 Suora pakkaskoe.....	29
9.3 Puristuslujuus.....	31
10 PÄÄTELMÄT	32
LÄHDELUETTELO	35

LIITTEET

Liite 1. Kumulatiivisesti mitattujen pintarapautumien tulokset

Liite 2. Dynaaminen kimmokerroin, tulokset

Liite 3. Tuoreen massan testaustulokset

Liite 4. Koekappaleiden puristuslujuudet

Käsitteet

AVA-mittaus	Air Void Analyzer/Ilmanlaatumittaus.
Huokosjakoanalyysi	Huokosjakoanalyysi suoritetaan mikroskoopin avulla kovettuneen betonin hiotulta ja kiillotetulta leikkuupinnalta.
Ominaispinta-ala	Huokosten pinta-ala suhteessa tilavuuteen. [mm ² /mm ³]
Suora pakkaskoe	Koekappale jäädytetään ja sulatetaan sykleittäin, jotta saadaan simuloitua betoniin kohdistuva pakkasrasitus ja sen aiheuttamat vauriot betonissa.
Dynaaminen kimmokerroin	Dynaaminen kimmokerroin saadaan ultraäänitutkimuksella ja se kertoo betonin mikrorakenteessa tapahtuneista muutoksista. [%]

1 JOHDANTO

Betonin liikaa kohonnut ilmamäärä on ongelma betonin lujuuden kannalta. Aalto-yliopiston betonitekniikan professori Jouni Punkki on Betonin kesäseminaarissa esittänyt, että keskimäärin massan ilmamäärän ollessa betoniaseamalla 6 %, nousee se kuljetuksen yhteydessä 4 % ja valettuna ilmamäärä on kohonnut jo yli 15 %:iin (Kuva 1). Tämä aiheuttaa betonirakenteissa lujuuskaatoa. Punkin mukaan suojahuokostus ei ole nykyisellään riittävän stabiili. (Punkki 2017.)



Kuva 1. Ilmamäärän lisääntyminen massassa sekoituksen, kuljetuksen sekä valun aikana ja ilmamääräpotentiaalin saavuttaminen.

Punkin mukaan lisäaineita tulisi kehittää siten, että ne toimivat nopeammin. Myös sekoituksen tehokkuutta tulisi parantaa joko sekoitusaikaa lisäämällä tai sekoittimen tehokkuutta parantamalla. Tarkoitus ei ole pyrkiä liian suuriin ilmamääriin vaan pienempään ilmamäärän nousuun kuljetuksen ja valun aikana. Tämä pienentää virhemarginaalia betonin koostumuksessa ja vähentää yllättävää ilmamäärän nousua rakenteessa. (Punkki 2017.)

Lisäaineiden reaktioajan nopeuttamisella sekä sekoitusta tehostamisella pyritään saavuttamaan betonin ilmamääräpotentiaali jo ennen kuin valmis betoni kuljetetaan eteenpäin. Tämä helpottaa huomattavasti betonin ilmamäärän sekä laadun valvontaa ja vähentää ilmamäärän lisääntymistä kuljetuksen ja valun aikana.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTAT

Betonin huokostamisesta ja ilmamäärän nousuun liittyvistä ongelmista on tehty lukuisia tutkimuksia ilmamäärän kohoamisen aiheuttaman lujuuskadon havaitsemisen myötä. Kohonneiden ilmamäärien aiheuttamat ongelmat ovat etenkin Suomen sääolosuhteissa kiistattomia, koska pakkasrasitus on niin suuri.

2.1 Huokostavien lisäaineiden vaikutus betoniin -tutkimus

Tämän opinnäytetyön aihetta käsittelevän tutkimuksen tuloksia on aiemmin esitelty 21.5.2017 Suboticassa Serbiassa järjestetyssä Contemporary achievements in civil engineering -konferenssissa. Tutkimuksessa on käsitelty huokostavien lisäaineiden vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Tutkittavaksi valmistettuja massoja oli neljä kappaletta. Käytetyt lisäaineet ovat samat kuin tässä opinnäytetyössä, lisäksi yksi koemassoista oli valmistettu referenssimassaksi ilman huokostinta. (Janković ym. 2017.)

Tutkimuksessa on testattu huokostimien vaikutusta tuoreen massan ominaisuuksiin sekä puristuslujuuteen 3, 7 sekä 28 vuorokauden ikäisenä SRPS U.M1.206 / 2013 -standardin mukaan. Tutkimuksessa käytetty betoni ei ole identtistä tässä tutkimuksessa käytetyn betonin kanssa, jolloin tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Tuloksista voidaan kuitenkin etsiä yhtäläisyyksiä tukemaan tämän tutkimuksen päätelmiä. (Janković ym. 2017.)

Tutkimuksen havaintojen mukaan massa, jossa huokostimena toimi SikaAer® Solid oli kaikkein tiiveintä ilmamäärämittauksen perusteella. Massassa, jossa käytettiin SikaAir-PRO V5:tä ilmamäärän lisääntyminen prosessin edetessä oli kaikkein suurinta, jopa 11 %. SikaControl® AER-200 P:tä ja SikaAer® Solidia käytettäessä ilmamäärä pysyi testin edetessä lähes vakiona. (Janković ym. 2017.)

Seitsemän päivän ikäisenä suurimman puristuslujuuden oli saavuttanut betoni, jossa oli käytetty huokostimena SikaAer® Solidia. Tulos oli 44,0 MPa. 28 päivän ikäisenä saman huokostimen tulos oli 56,9 MPa. (Janković ym. 2017.)

Heikoimman puristuslujuuden saavutti massa, jossa huokostimena toimi SikaAir-PRO V5. Massassa oli tapahtunut huomattavaa ilmamäärän nousua kokeen etenemisen aikana. Kirjattujen päätelmien mukaan parhaat kovettuneen betonin ominaisuudet saavutettiin SikaAer® Solid -huokostinta sisältävällä massalla. Huokosanalyysiä tai suoraa pakkaskoetta ei suoritettu, jolloin tulosten analysoinnissa esim. ilmamäärän osalta ei ole voitu päätellä betonin sisältämien huokosten laatua ja huokosjakamaa. (Janković ym. 2017.)

2.2 Robust Air -tutkimus

Jouni Punkki on vuonna 2017 esitellyt tilaustutkimusta, jonka tavoitteina ovat olleet selvittää suojahuokosten stabiilius sekä vaatimukset betonille, jolla riittävä suojahuokosten stabiilius voidaan saavuttaa. Tutkimuksessa on tutkittu betonimassan sekoituksen jälkeistä ilmamäärän nousua sekä ilmamäärän vaihtelua rakenteen sisällä. (Punkki 2017.)

Betonikokeissa valmistettiin kaksi erilaatuista betonia, joista kummassakin käytettiin kolmea erilaatua sementtiä. Betonin notkeudeksi oli määritelty F5 ja painumaluokaksi S3. Kaikki kokeet suoritettiin samoilla lisäaineilla. (Punkki 2017.)

Betonikokeissa ilmamäärät nousivat yllättävän paljon kautta linjan. Yksittäistä tekijää tälle oli vaikea nimetä. Korkeimmat mitatut ilmamäärät olivat jopa 15 %. Punkki kuitenkin arvelee betonin notkeuden olleen merkittävin tekijä. Tulosten tasaisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat olleet myös alhaiset vesisementti-suhteet sekä kohtuullisen korkeat sementtimäärät. Myös laboratorio-olosuhteet voivat vaikuttaa saatuihin tuloksiin. (Punkki 2017.)

Vastaavasti lisäainekokeissa oli tutkittu 7 eri toimittajan notkistin ja huokostin - yhdistelmiä. Tässä tutkimuksessa betonin koostumus pysyi vakiona. Lisäaineiden annostusta säädettiin niin, että tavoite ilmamäärä ja -notkeus saavutettiin. Massan vesimäärää ei tutkimuksen aikana muutettu. Tutkimuksessa havaittiin, että lisäaineiden välillä oli merkittäviä eroja. Huomattiin, että lisäaineissa oli kehitystarpeita. (Punkki 2017.)

Osaltaan tässä opinnäytetyössä pyritään vastaamaan Punkin asettamaan haasteeseen lisäaineiden kehityksestä Robust Airin viitoittamalla tiellä.

3 TUTKIMUSSUUNNITELMA

Tarve lisätutkimuksille on lähtöisin betonin sekä lisäaineiden valmistajilta. Vastaavanlaisia tutkimuksia on tehty jo aiemmin ja kaksi niistä on esitetty luvussa 3. Betonimassan ilmamäärän huono kontrolloitavuus ja heikko ennustettavuus

kuljetuksen ja valun aikana on huomattu betoniteollisuudessa ja tähän on pyritty keksimään erilaisia ratkaisuja. Loogisinta ilmamäärästä, huokosten laadusta ja huokosjaosta puhuttaessa on tutkia huokostimia ja niiden toimintaa sekä tuoda markkinoille huokostimia, joiden toimintaperiaate on täysin poikkeava edeltäjiinsä nähden.

Tutkimuksessa on haluttu tehdä ensivaiheen testauksia erilaisista huokostamistavoista ja selvittää, onko uusilla huokostimilla potentiaalia mahdollisiin jatkotutkimuksiin mm. kuljetusstabiiliuden osalta. Lujabetonilla on prosessien hallinnalla päästy hallittavissa olevaan ilmamäärän muutokseen kuljetuksen aikana.

Tuloksia jo markkinoilla olevan huokostimen tuloksiin vertailemalla saadaan arvokasta tietoa siitä, mitkä ovat uusien huokostimien positiivisia sekä negatiivisia vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Lisäksi tuloksien vertailuun on otettu mukaan porakappaleiden tuloksia ilman huokostinta valetusta betonista. Nämä kappaleet eivät olleet mukana alkuperäisissä valuissa, mutta olivat massaltaan samanlaisia ja siten vertailukelpoisia.

Opinnäytetyössä tutkitaan huokostavien lisäaineiden vaikutuksia säänkestävän betonin pakkasenkestävyyteen sekä lujuuteen. Jokaista valittua huokostinta käyttäen on valettu kahdeksan koekappaletta. Valitut huokostamistavat esitellään luvussa 8.2.

Kesällä 2019 tehtiin tutkimusta varten kaksi koemassaa, joiden perusteella päätettiin syksyn koekuutiovaluissa käytettävän betonin koostumus sekä keihtiin haluttua annostusta. Koemassoissa käytettiin tutkimuksen huokostimia. Huokostimet olivat SikaControl® AER-200 P sekä SikaAer® Solid.

Varsinaiset koekuutiovalut on suoritettu kahdessa osassa laboratorio-olosuhteissa. Kappaleiden puristuslujuudet on testattu 7 vuorokauden sekä standardin SFS-EN 12390-3 mukaan 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleista.

Tuoreelle massalle tehtiin valujen yhteydessä seuraavat mittaukset:

- Märkätiheys standardin SFS-EN 12350-6 mukaan

- Painuma standardin SFS-EN 12350-2 mukaan
- Ilmamäärä standardin SFS-EN 12350-7 mukaan
- AVA-mittaus Standardin ASTM C457 / C457M -16 mukaan.

Lisäksi massan koostumus, lämpötila ja muut huomiot on kirjattu ylös, jotta mahdolliset poikkeamat on osattu ottaa huomioon tuloksia analysoitaessa. Lämpötila mitattiin tuoreesta massasta sekä sekoittajassa, että muotissa, jotta tulos olisi luotettava.

Kappaleiden puristuslujuudet on testattu betonivalmistajan laboratoriossa. Huokosanalyysi ohjeen VTT TEST R003-00-2010 mukaisesti sekä laattakoe CEN/TR 15177 mukaan on tehty KymiLabsin akkreditoidussa betonintestauslaitoksessa.

Koekappaleet on tehty Lujabetoni Oy:n tilauksesta ja tutkittavat huokostimet ovat Oy Sika Finland Ab:n tuotteita.

4 BETONI

Betonimassa koostuu runkona toimivasta kiviaineksesta, sementistä, vedestä ja käytetyistä lisäaineista. Näiden keskinäistä seossuhdetta kutsutaan suhteitukseksi. Suhteitus määritetään betonin haluttujen ominaisuuksien mukaan. Betonin tyypillinen massa on 2400 kg/m^3 .

Sementti on 1...0 mikrometrin kokoiseksi jauhattua kalkkikiveä, joka toimii betonin hydraulisenä sideaineena. Betonin valmistamisen aikana sementtiin varastoitunut energia vapautuu hydrataatioreaktiossa. Sementin koostumuksella ja laadulla on olennainen vaikutus betonin lujuuteen. (Mehta & Montero 2014.)

Betonissa käytetään kiviaineksen, veden ja sementin lisäksi myös seosaineita, esimerkiksi masuunikuonaa, ja lisäaineita kuten notkistinta ja huokostinta. Lisäaineilla pyritään vaikuttamaan betonin ominaisuuksiin kuten säilyvyyteen, työstettävyyteen tai ilmamäärän kontrollointiin ja huokosten laatuun.

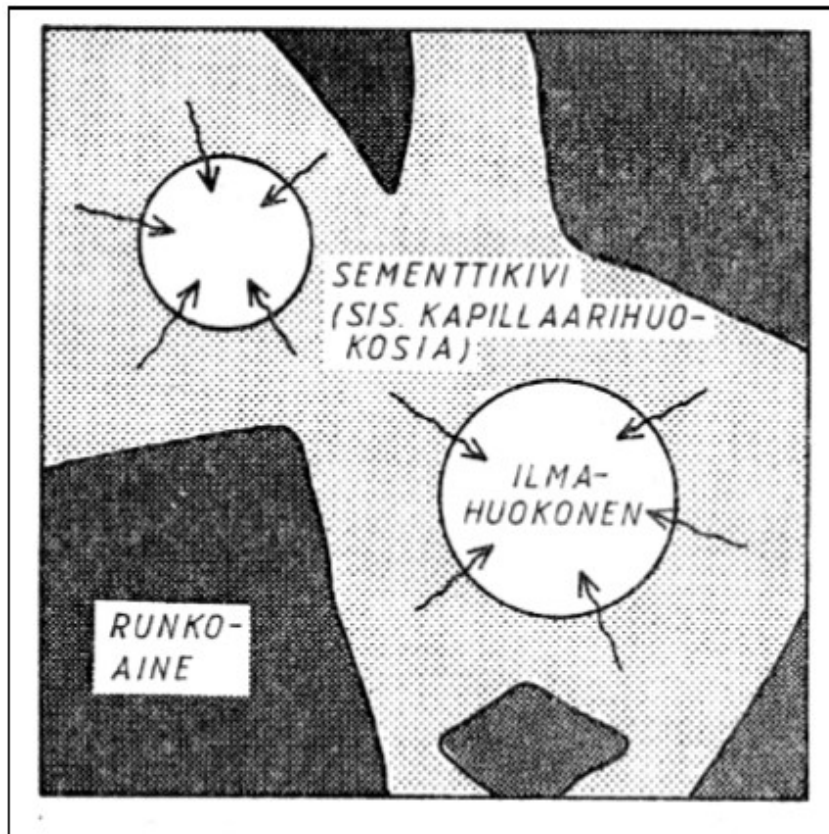
5 PAKKASRASITUS

Suomen olosuhteissa kaikki ulkona olevat rakenteet ovat pakkasrasituksen alaisia. Rasitus vaihtelee mm. rakenneosan sijainnin ja koon mukaan. Suurimpina vaikuttavina tekijöinä pakkasrasituksella toimivat betonissa oleva kosteus, suolat sekä jäätymis-sulamissyklien määrä. Pakkasrasituksen määrä korreloi betonin kosteuspitoisuuden kanssa. Mitä pienempi kosteuspitoisuus on, sitä pienempi pakkasrasitus betoniin kohdistuu. (Leivo 2000.)

Vesi laajenee jäätyessään 9 % (Vuorinen 2012). Lämpötilan muutokset aiheuttavat kovettuneessa betonirakenteessa tilavuuden muutoksia. Lämpötilan noustessa betoni laajenee ja lämpötilan laskiessa se kutistuu. Massan sisäinen mikrorakenne on merkittävässä asemassa betonin säänkestävyyden ja lujuuden kannalta. (Johansson 2020.)

Lämpötilan laskiessa, betonin kapillaarihuokosissa oleva vesi jäätyy. Jäätyvän veden laajenemisesta kovettuneeseen betonirakenteeseen syntyy sisäistä hydraulista painetta. Sulaessa ja jäätyessä paineen vaihtelu vähitellen rikkoo betonin mikrorakennetta. Tätä ilmiötä kutsutaan pakkasrapautumiseksi. Paras tapa vaikuttaa pakkasen kestävyYTEEN on huokosrakenteen, kuten huokosten koon, laadun ja tiheyden, säätely vesisementtisuhteella sekä lisäaineilla. (Johansson 2020.)

JäätymissykliEN aikana veden on tarkoitus kulkea kapillaarihuokosista suoja-huokosiin ja sulamisen aikana takaisin kapillaarihuokosiin (kuva2). Tällainen veden liike betonissa on pakkasenkestävyyden kannalta oleellista, jotta jäätymisestä syntyvä sisäinen paine pääsee tasaantumaan. SFS 7022:2019 s.18 on määritetty kovettuneen betonin huokosjaolle vaatimukset rasitusluokissa XF1 ja XF3. (Johansson 2020.)



Kuva 2. Veden kulkeutuminen kapillaarihuukosista ilmahuukosiin jäätymistilanteessa. (Vesikari 1986)

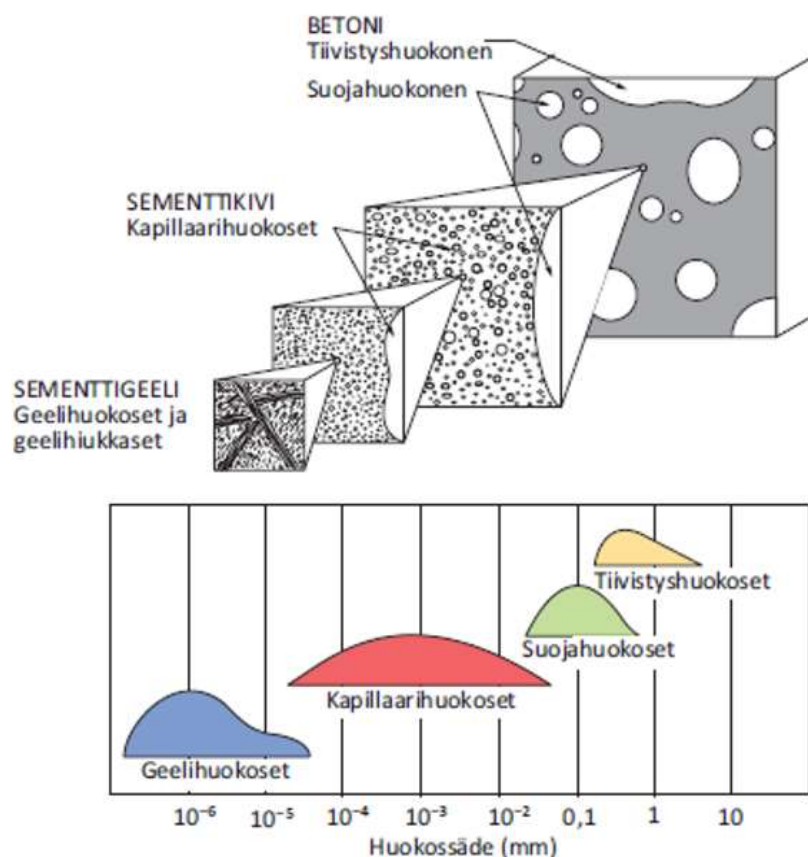
Pakkasrapautuminen näkyy eniten ohuissa rakenteissa, kuten ohutkuorisissa julkisivuissa. Näissä rakenteissa jäätymis-sulamissykliä on suuri. Massiivisissa rakenteissa pakkasrapautuman määrä on pienempi, koska niiden lämpötilamuutokset tapahtuvat huomattavasti hitaammin ja lämpötila jakautuu tasaisemmin koko rakenteeseen. Lisäksi massiivinen rakenne luovuttaa lämpöä hitaammin. (Suonketo. s.a.)

6 BETONIN ILMAMÄÄRÄ JA SUOJAHUOKOSET

Betonilla on nk. ilmamääräpotentiaali eli maksimi-ilmamäärä. Ilmamääräpotentiaaliin vaikuttavat käytetyt lisäaineet, betonin koostumus ja sementtityyppi sekä notkeus. Ilmamäärän nousun riski kuljetuksen ja valun aikana on korkea, mikäli maksimi ilmamäärää ei saavuteta massan sekoituksen aikana. (Punkki 2017.)

Huokostimilla pyritään saamaan betonissa aikaan suojahuokosia. Yleensä huokostimien raaka-aineet ovat molekyylejä, joille luonteenomaista ovat hydrofiiliset (vesihakuiset) ja hydrofobiset (vettähykkivät) molekyyliryhmät. (Tepponen 2018.)

Betonin kokonaisilmamäärä ei ole ratkaiseva tekijä pakkasenkestävyyden kannalta. Huokosten on oltava kooltaan riittävän pieniä ja niiden tulee jakautua riittävän tiheästi sementtikiven ympärille, jotta ilmamäärän hyöty saadaan optimoitua. Suurimman osan huokosista tulee olla halkaisijaltaan alle 0,3 mm (Tepponen 2018, 4.). Huokokset jaotellaan syntymekanismin ja kokonsa perusteella geeli-, kapillaari-, supistumis- sekä tiivistyshuokosiin (kuva 3) (BY65 Betoninormit 2018.).



Kuva 3. Huokosrakenne ja huukostyyppien koot säteittäin [mm]. (Johansson 2020)

Geelihuokokset ovat sementtigelikiteiden väliin muodostuvaa vesitäytteistä vapaata tilaa. Tila on kooltaan n. 1...5 nanometriä ja veden liike huukosissa on todella hidasta. Tämä geelivesi ei yleensä pääse jäätymään. Sementtigelin kokonaistilavuudesta 25...30 % on geelihuukosia. (Johansson 2020.)

Yhtenäiset kapillaarihuokokset ovat betonille haitallisia. Kapillaarihuokosia syntyy betonimassassa tapahtuvassa hydrataatioreaktiossa, mikäli vesisementti-suhde on yli 0,4. Mikäli suhde on yli 0,6, kapillaarihuokokset ovat yhtenäisiä, jolloin haitallinen kapillaarinen liike betonissa on mahdollinen. Raja-arvot ovat vain suuntaa antavia, koska massa ei hydratoidu ikinä täysin. (Johansson 2020.)

Suojahuokokset ovat kooltaan 0,01...0,08 mm. Niiden tarkoitus on antaa betonin sisällä olevalle kosteudelle tilaa laajeta jäätyessään. Huokosjaon sallittu enimmäisarvo on 0,27 mm luokassa XF 1, jolloin huokosten etäisyyden toisistaan tulee olla enintään 0,54 mm. Suojahuukosilla pyritään vähentämään betonin rapautumista ja halkeilua pakkasolosuhteissa. (BY65 2018) Suojahuokosten osuus betonin tilavuudesta on noin 2,5...8 % (Johansson 2020).

Betonin pakkasrapautumista voidaan tutkia suorilla pakkaskokeilla joko suolan kanssa tai ilman. Betonin suojahuokosten määrä vaikuttaa betonissa pakkasen ja suolan aiheuttamien vaurioiden määrään. Huokosten kokoa, huokosjakoa ja niiden laatua tutkitaan ja mitataan huokosjakoanalyysillä.

7 TUTKIMUKSESSA KÄYTETTY BETONI SEKÄ HUOKOSTIMET

7.1 Massan koostumus

Betonin massaksi on määritetty SK C30/37 maksimiraekoko 16 painumaluokka S3. Koekuutiossa on käytetty saman tuotevalmistajan notkistinta, sekä tutkittavia huokostimia, jotka on esitetty kappaleessa 8.2. Massoissa käytetty huokostimen määrä vaihteli 0,8...1,1 %:n välillä. SikaAer Solidia oli massasta 0,8 % eli 8,72 kg, SikaAir Prota 1,05 % eli 7,54 kg ja Sika Control AER-200 P:tä 1,1 % eli 7,20 kg (Liite 3). Jokaista massaa valmistettiin ~2,5 m².

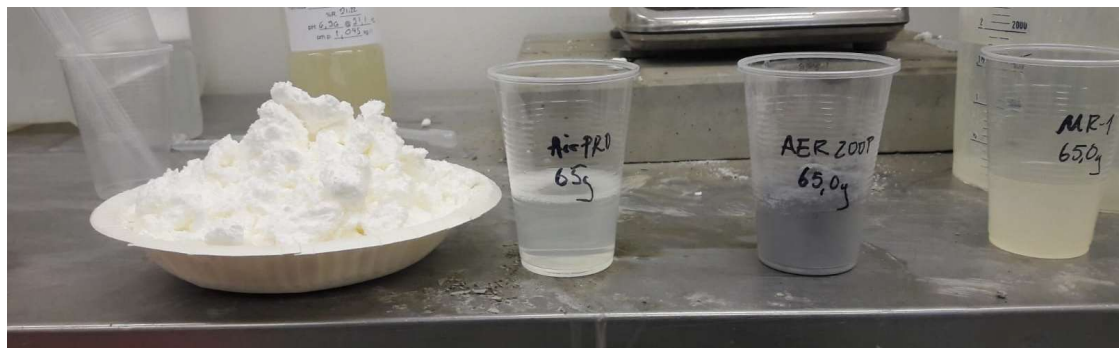
Koekuutiot valettiin betonin valmistuspaikalla, jolloin massan kuljetus ei ole vaikuttanut sen ominaisuuksiin. Kuljetusstabiiliutta ei täten päästy tutkimaan kuin teoreettisella tasolla.

Tässä opinnäytetyössä kaikki koemassat on pyritty valmistamaan toistensa kaltaisiksi niiden vertailukelpoisuuden mahdollistamiseksi. Jokaista käytettyä huokostinta varten massa on kuitenkin valmistettu erikseen. Tämä tulee huomioida tuloksia analysoitaessa.

7.2 Huokostimet

Pelkästään betonin ilmamäärä ei kerro huokosten koosta ja ominaisuuksista. Huokosten halutun koon, etäisyyden ja laadun varmistamiseksi koekappaleille on suoritettu huokosanalyysi.

Tutkimuksessa käytetyt huokostimet sekä referenssimassassa käytetty huokostin eroavat toisistaan huomattavasti koostumuksellisesti ja toiminnallisesti, mutta jokaisen huokostimen käytöllä pyritään samaan lopputulokseen. Kaikki huokostimet ovat saman yrityksen tuotteita (kuva 4). Referenssimassassa käytetty huokostin on jo markkinoilla oleva, mutta vertailtavat huokostimet eivät ole myynnissä Suomessa.



Kuva 4. Tutkimuksessa käytetyt lisäaineet.

7.2.1 SikaAir-PRO V5

SikaAir-PRO V5 on CE-merkitty huokostin, joka on olomuodoltaan nestettä (kuva 4 toinen vasemmalta). Se on referenssimassassa käytetty huokostava lisäaine. Sen toiminta perustuu pinta-aktiivisiin aineisiin. Lisäaineen tarkoitus on tuottaa hyvin pienistä ilmahuukosista muodostuva hienojakoinen systeemi betoniin. (SikaAir-PRO V5 2013.) Suojahuukosten koko on 0,03...0,04 mm (Mäkikyrö 2017).

Huokostin vangitsee ilman veteen oikean kokoisina suojahuokosina. Se muodostaa veden ja ilman väliin kalvon. Huokosten määrä on suhteessa annosteltavan huokostimen määrään sekä betonin sekoitusaikaan ja massan lämpötilaan. Yliannosteltuna huokostin lisää kokonaisilmamäärää betonissa ja aiheuttaa kovettuneen betonin lujuuskatoa. Huokostin vaikuttaa myös betonin muihin ominaisuuksiin, kuten työstettävyyteen sekä notkeuteen. (SikaAir-PRO V5 2013.)

Huokostimen annostus on normaalitilanteessa 0,05 % sideaineen painosta huokostimen ollessa laimentamatonta. Huokostimen tiheys on 1,008 kg/dm³. Se lisätään massaan sekoitusveden mukana. Optimaalinen lämpötila huokostimen toiminnan kannalta on +10 °C...+30 °C. Muita huokosten määrään ja rakenteeseen vaikuttavia tekijöitä massassa ovat vesimäärä, kiviaineksen suhteitus ja muoto, hienoaineksen määrä ja muoto sekä massan notkeus. (SikaAir-PRO V5 2013.)

7.2.2 SikaControl® AER-200 P

SikaControl® AER-200 P on seos kalsiumkarbonaattia sekä muita aineita ja se sekoitetaan ensin sementtiin, jonka jälkeen ne lisätään yhtä aikaa sekoitusvaiheessa. Aine on olomuodoltaan hopeanharmaata jauhetta (kuva 5.). Se on ensimmäinen huokostimista, jonka vaikutuksia betonin ominaisuuksiin opinnäytetyössä tarkastellaan. (SikaControl® AER-200 P 2017.)



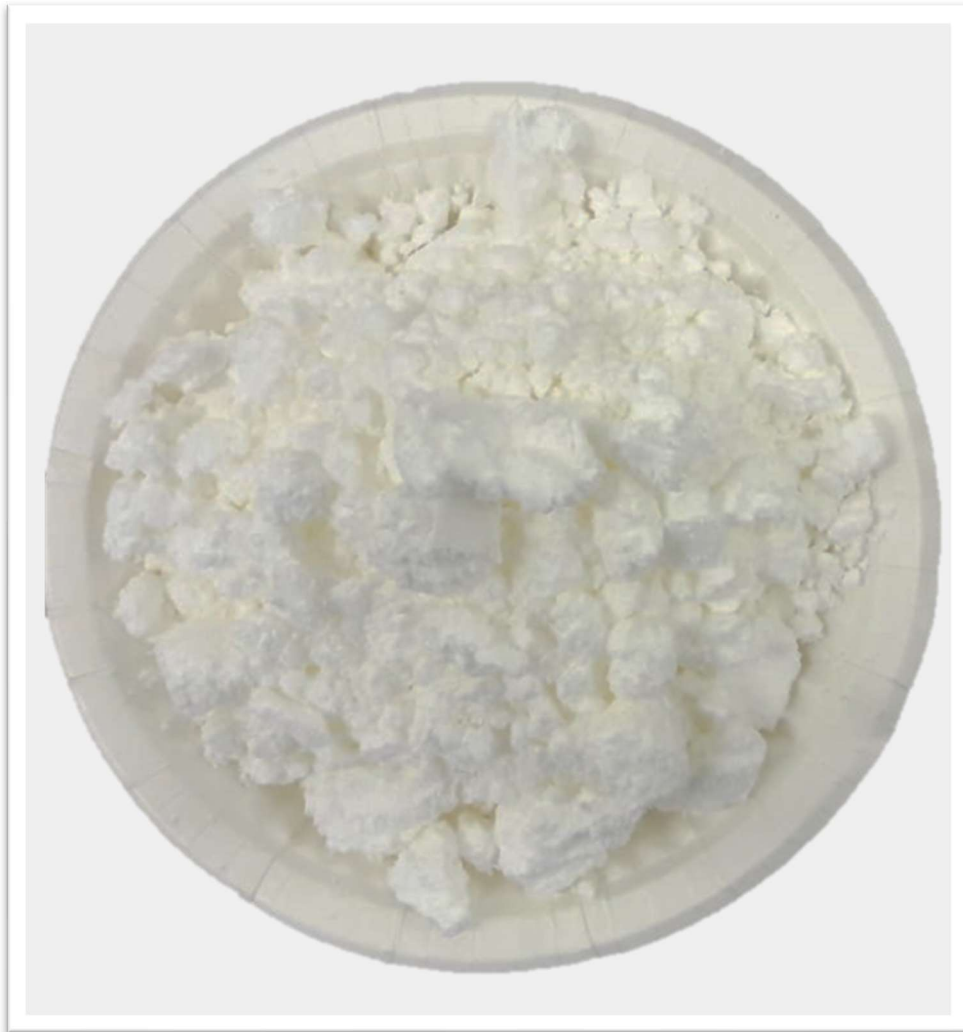
Kuva 5. SikaControl® AER-200 P -huokostimen punnitseminen.

Huokostimen tarkoitus on saada aikaan tasaisesti jakautuneita mikrohuokosia betoniin. Yli 60 % suojahuokosten kokonaismäärästä on alle 0,3 mm riippuen sekoitustavasta. (Schwoon 2020.)

Huokostimen toiminta perustuu kemialliseen reaktioon. Tämän takia betonin mekaanisella työstöllä ei ole vaikutusta lisäaineen tuottamaan ilmamäärään vaan ainoastaan huokosten jakautumiseen betonissa. Perinteisiin huokostimiin verrattuna SikaControl® AER-200 P saa betonissa aikaan suotuisamman huokosjaon sekä tuottaa huokosiin suuremman ominaispinta-alan. (SikaControl® AER-200 P 2017.)

7.2.3 SikaAer® Solid

Toinen tutkittavista huokostimista koostuu esivalmistetuista elastisista akryylinitriilipolymeeri -ilmahuokosista (kuva 6.), jotka ovat kooltaan ja muodoltaan samankaltaisia kuin perinteisillä huokostusmenetelmillä tuotetut suojahuokokset eli 0,02...0,08 mm (SikaAer® Solid s.a.)



Kuva 6. Akryylinitriilipolymeeri-ilmahuokosia.

8 KOKEET JA LABORAATIOT

8.1 Ilmamäärämittaus ja AVA-mittaus

Tuoreesta massasta betonin ilmamäärä voidaan mitata joko painemittarimenetelmällä tai vesipatsasmenetelmällä. Tässä tutkimuksessa tuoreen massan ilmamäärä on mitattu painemittausmenetelmällä (kuva 7).



Kuva 7. Painemittausmenetelmässä käytettävä ilmamäärämittari.

Menetelmässä painemittaussäiliö täytetään betonimassalla. Oleellista on, että betoni on täydellisesti tiivistynyt. Liiallista tärytystä tulee kuitenkin välttää, jotta näytteestä ei poistu huokosilma. Liiallinen täryttäminen sekä ylimääräisen massan poistaminen säiliöstä voivat mahdollisesti vääristää tulosta. (SFS-EN 12350-7, 2009: 2020.)

Ilmamäärille vähimmäisraja-arvot, kun suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta, ovat rasiusluokittain XF1/XF3: 4,0 % ja XF2: 5,0 % sekä XF4: 5,0 %. Tuloksissa sallitaan kuitenkin vaihtelua (taulukko 1) (SFS-EN 206:2014)

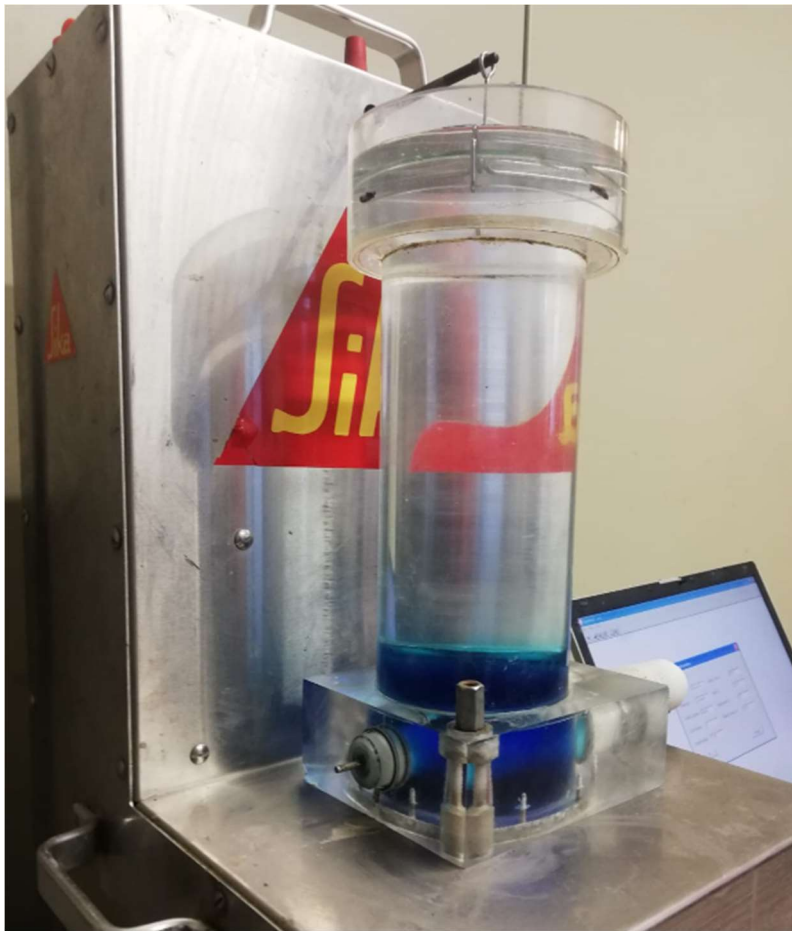
Taulukko 1: Ennako- ja tasokokeiden sekä jatkuvan tuotannon sallittu ilmamäärän vaihtelualue tavoiteilmamäärän perusteella (SFS-EN 206:2014)

	Tavoiteilmamäärä, %				
	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
Ennako- ja tasokokeiden ilmamäärä	≤ 5,0 %	≤ 5,5 %	≤ 6,0 %	≤ 6,5 %	≤ 7,0 %
Jatkuvan tuotannon ilmamäärä	3,0...6,5 %	3,5...7,0 %	4,0...7,5 %	4,5...8,0 %	5,0...8,5 %

Standardin SFS-EN 125350-7 mukaan ilmamäärämittauksessa on otettava huomioon mittaustuloksesta vähennettävä kiviaineksen korjaustekijä. Tavallisesti korjaustekijä on 0,1...0,2 %. Tässä tutkimuksessa korjaustekijää ei ole otettu huomioon, koska otanta on suhteellisen pieni ja ilmamäärämittauksia on tehty yksi jokaiselle tuoreelle betonimassalle.

Yksi vaihtoehto ilmamäärän mittaamiseen on AVA-mittaus (Kuva 8). AVA-mittauksella pystytään mittaamaan tuoreen betonin huokosjako sekä huokosten koko ja ominaispinta-ala. Pääsääntöisesti AVA-mittauksen tulokset ovat olleet samansuuntaisia kuin ohut- ja pintahieanalyysissä. Testausmenetelmät eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia. (Semtu uutiset 2017.)

AVA-mittauksessa huomioidaan ainoastaan alle 3 mm halkaisijaltaan olevat ilmakuplat. Tämän takia mittauksen antama kokonaisilmamäärä jää usein 1,5...2 % tavallisen ilmamäärämittarin lukemaa alhaisemmaksi. (Ahokas 2017)



Kuva 8. AVA-mittauslaite

8.2 Puristuslujuus

Kappaleen puristuslujuus kertoo sen kyvystä ottaa vastaan puristavaa voimaa. Puristuslujuuden yksikkö on MPa [N/mm^2]. Betonin puristuslujuus on tyypillisesti 30...60 MPa. (Mehta & Montero 2014)

Betonin puristuslujuus mitataan standardin SFS-EN 12390-3 mukaan 28 vuorokauden ikäisestä koekappaleesta. Koekappale voi olla muodoltaan kuutio tai lieriö. Tässä työssä puristuslujuus mitattiin sekä 7 että 28 vuorokauden ikäisistä koekappaleista. Puristuslujuudet testattiin Lujabetoni Oy:n toimesta Lahden tehtaalla.

Puristuslujuuden vertailusuurena käytetään niin kutsuttua C-lujuutta eli 150 mm x 300 mm:n lieriön tai K-lujuutta eli 150 mm x 150 mm:n kuution puristuslujuutta (BY65 Betoninormit 2018). Tässä tutkimuksessa betonin puristuslujuusluokka on C30/37, jossa 30 tarkoittaa lieriölujuutta ja 37 kuutiolujuutta.

Tämä tarkoittaa sitä, että lieriön muotoisen koekappaleen tulee kestää 30 MPa:n puristus ja kuution (kuva 9) muotoisen 37 MPa:n puristus.



Kuva 9. Koekuutiovaluissa käytetyt muotit puhdistettavana ennen valua.

Kappaleiden puristuslujuudet on testattu standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti Lujabetoni Oy:n Lahden tehtaalla.

8.3 Suora pakkaskoe

Suoralla pakkaskokeella testataan betonin pakkasenkestoa. Pakkaskoe perustuu jäätymis-sulamissykliin määrään. Määrätyin välein syklien välissä koekappaleista poistetaan mekaanisesti irtoaines, joka kuivataan ja punnitaan

(kuva 11). Lisäksi koekappaleille tehdään ultraäänimittaus, jonka avulla pyritään selvittämään vaurioita kappaleen sisällä (kuva 10). Tämä sisäinen vaurio näkyy kimmokertoimen muutoksena. Tätä opinnäytetyötä varten tehdyssä koeksessa oli 56 sykliä. Suora pakkaskoe toteutettiin KymiLabsin toimesta ja olin itse mukana seuraamassa sekä tutustumassa kokeeseen. Kokeen tulokset ovat laboratorioinsinöörin kirjaamia.

Kokeessa jäätymissykliden simulointi tapahtuu kaapissa, jonka lämpötilaa vaihdetaan syklin mukaan +20 ja -20 °C välillä. Yhden syklin pituus on 24 tuntia. (CEN/TS 12390-9 2016, 10–12.)

Tulokset kertovat neliömetrin alalta irronneen materiaalin määrän. Tuloksia vertaillaan taulukon 2 avulla halutun rasitusluokan raja-arvoihin. Raja-arvoja taulukossa kuvataan suureella m_{56} . Taulukossa 2 on esitetty myös raja-arvot dynaamiselle kimmokertoimelle pakkaskokeen aikana.

Taulukko 2. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyden vaatimukset, kun rakenteen suunniteltu käyttöikä on 50 tai 100 vuotta. (SFS 7022, Liite A s.18)

Suunniteltu käyttöikä vuosina	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako VTT TEST R003-00-2010 mukaan		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447			Laattakoe, CEN/TR 15177 (XF1 ja XF3), CEN/TS 12390-9 (XF2 ja XF4)	
		Enimmäisarvo, mm		Sykliden lukumäärä	Taivutus- tai halkaisuveto-lujuuksien suhde (%)	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin RDM (%)	Rapauma 56 syklin jälkeen m (g/m ²)	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin RDM 56 syklin jälkeen (%)
		$w/c > 0,40$	$w/c < 0,40$					
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 500$	RDM ≥ 67
	XF2	-	-	-	-	-	$m_{56} \leq 650$	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 200$	RDM ≥ 75
	XF4	-	-	-	-	-	$m_{56} \leq 350$	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	$m_{56} \leq 200$	RDM ≥ 75
	XF2	-	-	-	-	-	$m_{56} \leq 500$	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	$m_{56} \leq 100$	RDM ≥ 85
	XF4	-	-	-	-	-	$m_{56} \leq 250$	-



Kuva 10. Koelieriölle tehtävä ultraäänimittaus kertoo betonin sisäisistä vaurioista.



Kuva 11. Koekappaleen pinnalle muodostunut irtoaines poistetaan mekaanisesti ja punnitaan.

8.4 Huokosjakoanalyysi

Kovettuneesta betonimassasta huokostimen kokoa, laatua ja huokosjakoa on mahdollista mitata huokosjakoanalyysillä. Tätä opinnäytetyötä varten kappaleille tehtiin pintahieanalyysi. Pintahiettä tarkastellaan suoraan hiotulta ja kiillotetulta pinnalta mikroskoopin avulla.

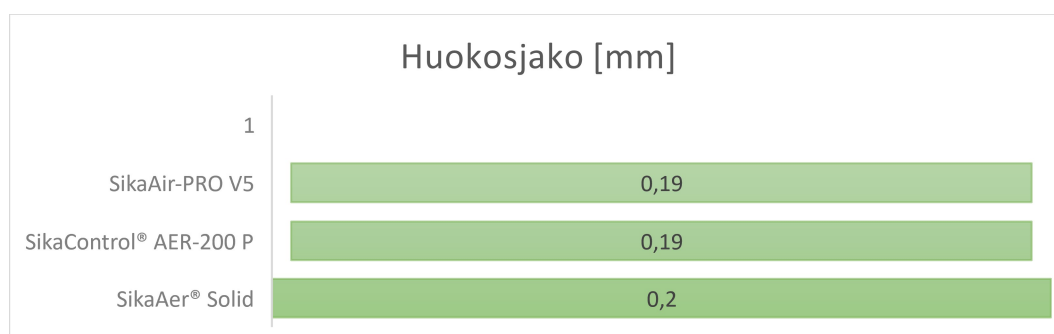
Pintahiekokeesta saatavia parametreja ovat kokonaisilmamäärä, suojahuokosten sekä tiivistyshuokosten ilmamäärä, huokosjako sekä ominaispinta-ala ja pastaprocentti.

Pintahieen valmistuskohtaa valittaessa on huomioitava että, mikäli maksimiraekoko on yli 16 mm, on näyte otettava kohdasta, jossa sementtipastaa on yli 23 % tutkittavasta pinta-alasta. Tavallisesti valmistuskohdaksi valitaan porakappaleesta syvyysuuntaan 5 mm ulkopinnasta. (VTT Expert Services Oy 2011, 4–6.) Tässä tapauksessa kiviaineksen maksimiraekoko oli 16 mm, jolloin pintahie oli teoriassa mahdollista ottaa mistä vain kohdasta koekappaletta. Huokosjakoanalyysi on suoritettu KymiLabsin toimesta ja tulokset on kirjannut laboratorioinsinööri.

9 TULOSTEN ANALYSOINTI

9.1 Huokosjakoanalyysi

Kussakin massoissa huokosjako oli suuruusluokaltaan sama. SikaAir-PRO V5 - ja SikaControl AER-200 P -huokostimia sisältävien massojen huokosjako oli 0,19 mm, kun taas SikaAer Solid huokostinta käytettäessä huokosjako oli 0,20 mm. Tulokset on esitetty kuvassa 11. Huokosjaon sallittu enimmäisarvo on 0,27 mm luokassa XF 1. Jokaisella huokostimella alitettiin enimmäisarvo.



Kuva 11. Huokosjako massoittain.

AVA-mittauksessa huokosjako vaihteli 0,22...0,94 mm:n välillä. Suurin huokosjako, 0,94 mm tuli tulokseksi SikaAer Solid huokostinta sisältävällä massalla. Todennäköisin syy tähän on se, ettei menetelmä sovi kyseessä olevalle huokostimelle.

Näytteistä tehtyjen huokosjakoanalyysien mukaan ominaispinta-alat vaihtelivat 25...38 mm²/mm³ välillä (kuva 12). Sika Control AER-200 P:llä tuloksena oli pienin ominaispinta-ala, 25 mm²/mm³. Suurin ominaispinta-ala massaan saatiin SikaAER Solid -huokostinta käytettäessä 38 mm²/mm³.

Pienimmän ominaispinta-alan omaavat huokokset ovat tilavuudeltaan suurimpia. Ominaispinta-alalle ei ole määritetty tavoitearvoa menetelmäohjeessa, mutta normaalisti tulokset vaihtelevat 20...50 mm²/mm³ välillä. Tulokset olivat massojen välillä todella tasaisia.



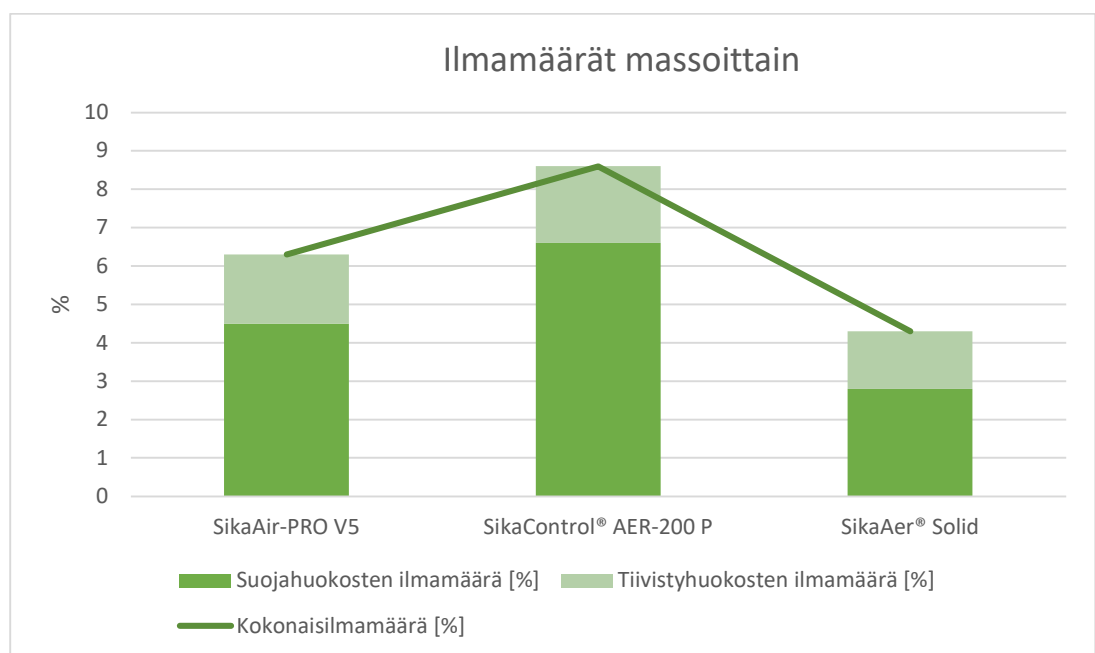
Kuva 12. Huokosten ominaispinta-ala massoittain

Suojahuokosten ilmamäärä erosi huokosten välillä huomattavasti: ero oli jopa 4,8 %. Tiivistyshuokosten määrä jakautui skaalaan 1,5...2,0 %, ja sen tiivistys-huokosten määrä massoissa oli suhteellisen suuri (Kuva 13).

SikaAir-PRO V5:llä kokonaisilmamääräksi saatiin 6,3 %, suojahuokosten ilmamäärä oli 4,5 % ja tiivistyshuokosten 1,8 %. Massan tulokset ilmamäärän suhteen mukailivat keskiarvoa verrattuna kahteen muuhun massaan (kuva 13). Tulokseen on voinut vaikuttaa se, että huokostin ja sen annostelu massaan on jo standardoitu.

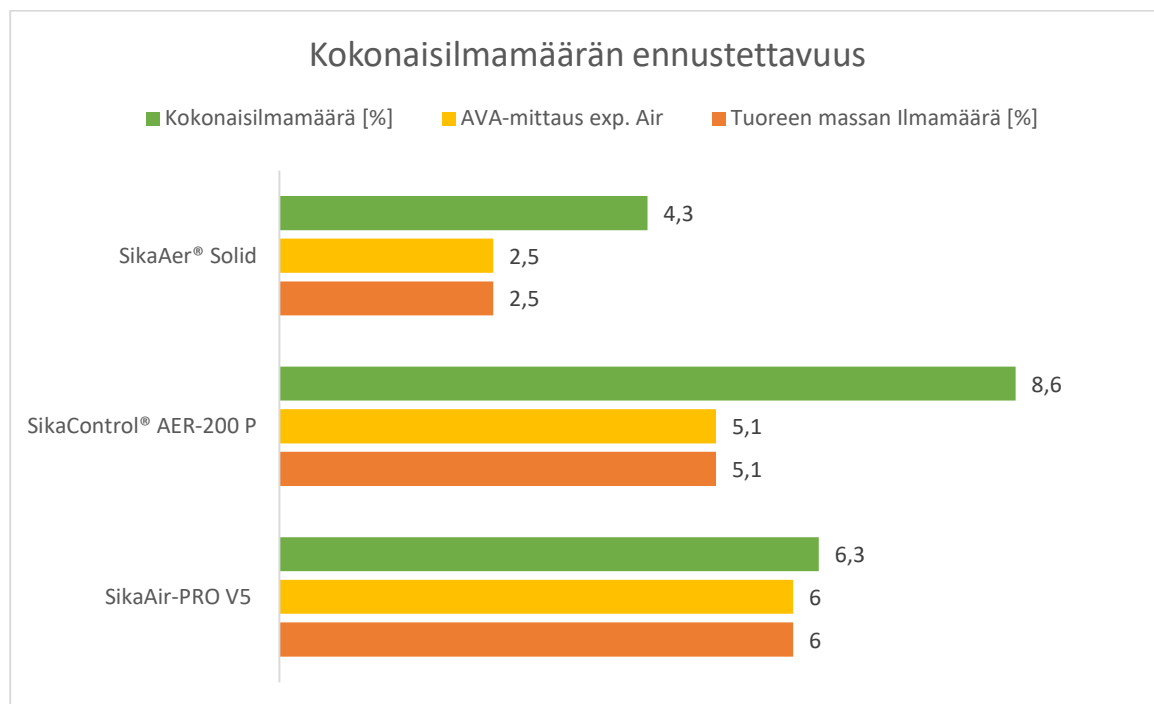
Suurin ilmamäärä (8,6 %) betoniin syntyi huokostimella SikaControl® AER-200 P. Tästä suojahuokosia oli peräti 6,6 %. Tiivistyshuokosten määrä massassa oli 2 %. Kemiallisesti toimivan huokostimen suojahuokosten määrä on helposti säädeltävissä annoskokoa muuttamalla. Tässä massassa huokostimen annostus oli suurempi kuin muissa massoissa. SikaControl® AER-200 P:n annoskoon vaikutusta maksimi-ilmamäärään kannattaa tutkia lisää. Lisäksi sekoitusaikaa maksimi-ilmamäärän saavuttamiseksi kannattaa tutkia.

Pienimmän ilmamäärän, 4,3 %, betoniin aikaan sai SikaAer Solid, jolla myös tiivistyshuokosten ilmamäärä oli kaikkein pienin 1,5 %. Suojahuokosten määrä jäi vain 2,8 %. Koska huokostin itsessään on suojahuokosia, on suojahuokosten määrää helppo lisätä annosta kasvattamalla tiivistyshuokosten määrän silti muuttumatta.



Kuva 13. Huokosjakoparametrin tulokset taulukoituna

Kaikkein lähimpänä tuoreen massan testejä ilmamäärältään oli SikaAir-PRO V5. Kovettuneen betonin ilmamäärätulos erosi tuoreesta massasta vain 0,3 %. Kaikkein vaikein ennustettavuus tuoreen massan testeissä on SikaControl AER-200P -huokostinta sisältävällä betonilla. Ilmamäärän kasvu jopa 3,5 % viittaa siihen, että kemiallinen huokostin muodostaa massaansa huokosia vielä kovettumisen aikana.



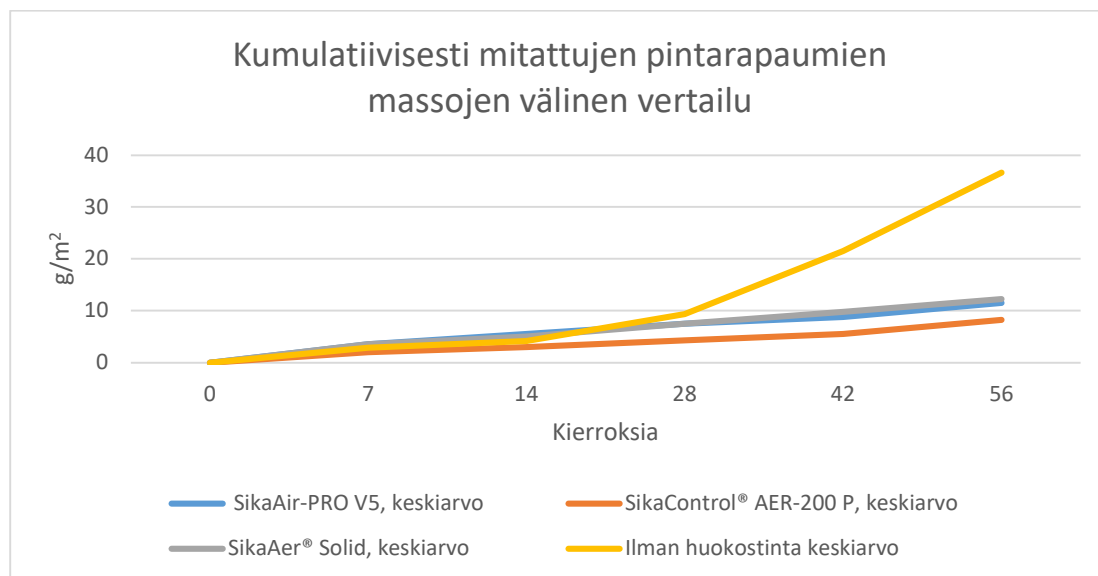
Kuva 14. Kokonaisilmamäärän ennustettavuus tuoreen massan testeistä

9.2 Suora pakkaskoe

Suorassa pakkaskokeessa 56 syklillä tavoitearvo rapaumalle 56 kierroksen jälkeen on maksimissaan 500 g/m². Saaduissa tuloksissa tämä alittui reilusti. Tässä kokeessa oli vertailun vuoksi mukana massa ilman huokostinta. Tämän massan rapauma oli 36,67 g/m², joka oli noin kolminkertainen suurimpaan keskiarvoon verrattaessa huokostetuista massoista. Ilman huokostinta tehdyissä koekappaleissa rapaukset 56 syklillä vaihtelivat 6...60 g/m² välillä (Liite 1), jolloin tulos on heikosti ennustettavissa.

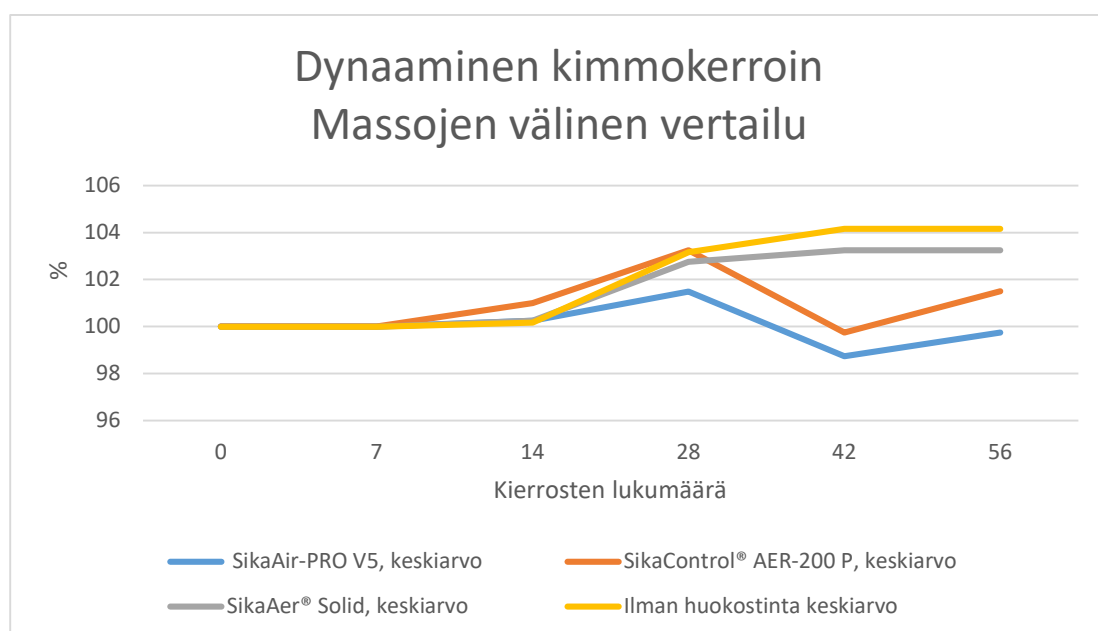
Parhaiten keskiarvon perusteella menestyi SikaControl AER-200 P, eli kemiallisesti toimiva huokostin. Sen keskiarvorapauma 56 kierroksen kohdalla oli vain 8,25 g/m². Tällä huokostimella tulokset vaihtelivat 7...9 g/m² välillä (Liite 1).

Sika Air-PRO V5, referenssihuokostin, sekä Sika Aer Solid, mekaaninen huokostin, pysyivät tuloksissa samassa luokassa niiden keskiarvojen ollessa välillä 11,5...12,25 g/m². Referenssihuokostimella tulokset heittelivät hieman enemmän ollen välillä 9...15 g/m². Mekaanisella huokostimella tulokset pysyivät välillä 10...15 g/m².



Kuva 15. Kumulatiivisesti mitattujen pintarapaumien tulokset

Dynaamisen kimmokertoimen tavoitearvo 56 syklillä rasitusluokassa XF1 massalla on ≥ 67 %. Mikään massoista ei käynyt alle 98 %:n tai ylittänyt arvoa 106 % (Liite 2). Suurimmat poikkeamat lineaarisesta käyrästä kimmokertoimen osalta tekivät massat, joissa huokostimena oli käytetty referanssihuokostinta sekä SikaControl AER-200 P:tä (kuva 16).



Kuva 16. Dynaamiset kimmokertoimet massojen keskiarvoja vertaillen.

Alhaisin tulos, 98 %, todettiin koekappaleella 1.1, jossa huokostimena oli käytetty SikaAir-PRO V5 -huokostinta. Korkein tulos, 106 %, toistui useaan otteeseen massassa, jossa oli huokostimena valmiit ilmakuplat, sekä massassa, jossa ei ollut käytetty huokostinta (Liite 2).

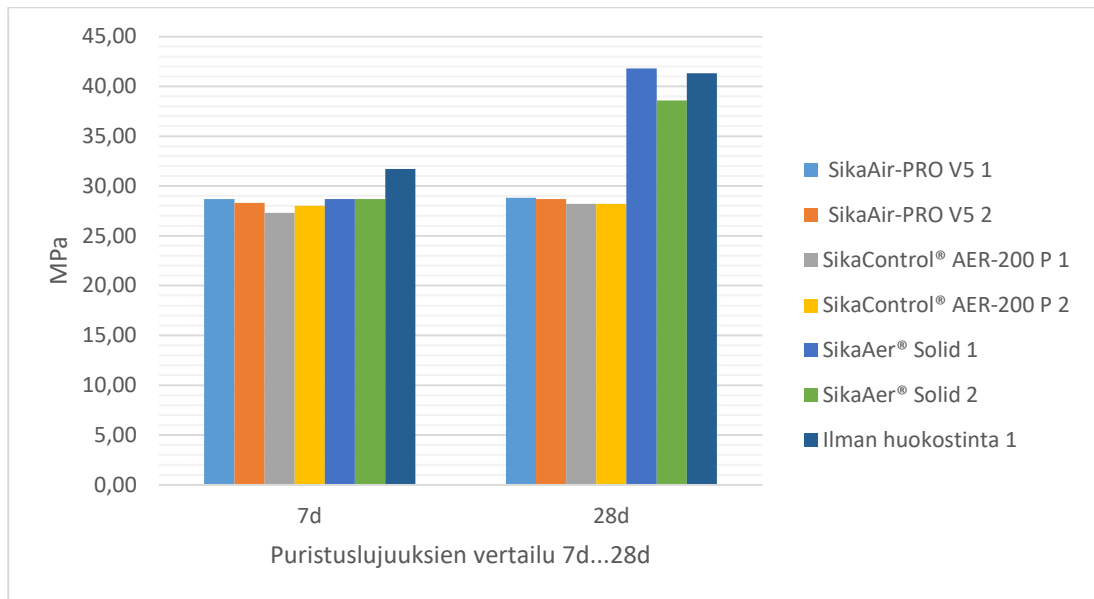
9.3 Puristuslujuus

Tavoitelujuus C30/37 betonista valetuilla koekappaleilla on 28 vuorokauden iässä 30 MPa lieriön muotoisilla kappaleilla ja 37 MPa kuution muotoisilla koekappaleilla.

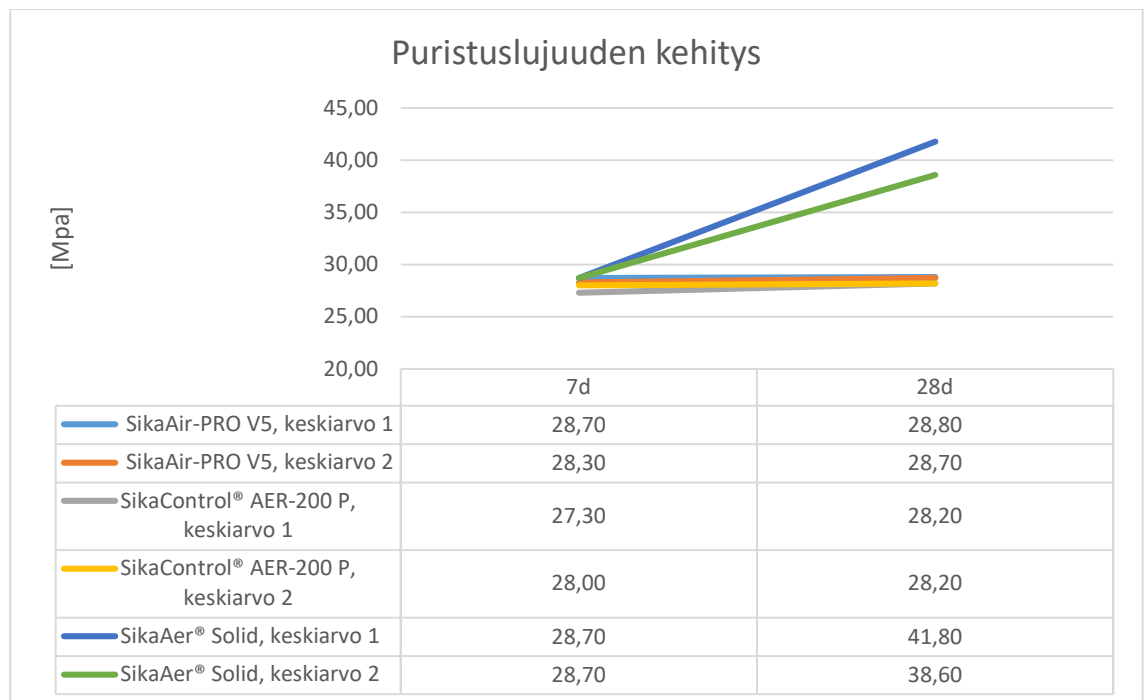
7 vuorokauden ikäisistä kappaleista suurimman puristuslujuuden, 31,7 MPa, saavutti ilman huokostinta valettu lieriön muotoinen kappale (kuva 17). Tulos oli odotettavissa, koska myös ilmamäärä on alhaisempi ilman huokostinta valetussa kappaleessa. Koekappale saavutti tavoitelujuuden siis jo 7 vuorokauden ikäisenä, 28 vuorokauden ikäisen kappaleen puristuslujuus oli jopa 41,3 MPa.

Muiden koekappaleiden puristuslujuudet 7 vuorokauden iässä vaihtelivat välillä 27,3...28,7 MPa (Kuva 17). Suurin lujuudenkehitys (Kuva 18) tapahtui SikaAer Solid koekappaleella 1, jonka puristuslujuus 28 vuorokauden iässä oli 41,8 MPa.

Koekappaleet, joissa oli käytetty muita huokostimia, jäivät lujuudenkehitykseltään alhaiseksi. Tulokset 28 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla vaihtelivat 28,2...28,8 MPa välillä jääden alle tavoitelujuuden.



Kuva 17. Puristuslujuuksien vertailu kappalekohtaisesti 7 ja 28 vuorokaudenikäisistä koekappaleista



Kuva 18. Puristuslujuuden kehitys massakohtaiseen keskiarvoon perustuen

10 PÄÄTELMÄT

Kemiallisesta reaktiosta sekä esivalmistetuista huokosista on merkittävää etua betonin kuljetusstabiiliuden, ennustettavuuden sekä tasaisen laadun saavuttamisen kannalta. Kemiallisen reaktion avulla toimiva huokostin ei tuota ilmaa betoniin loputtomiin, vaan se saavuttaa oikealla annostuksella ilmamääräpotentiaalin halutussa vaiheessa valmistusprosessia. Esivalmistettujen huokosten osalta maksimi-ilmamäärä saavutetaan, kun huokokset on lisätty massan

sekaan. Kuljetuksen aikana syntyvä ilma ei siis ole enää huokostimen synnyttämää ilmaa.

Huokostimen annostus on mahdollista optimoida oikean huokosjaon ja ilmamäärän saavuttamiseksi, koska huokostimen ilman tuottaminen betoniin loppuu tietyssä vaiheessa prosessia. Sekoituksen onnistuessa on näillä huokostimilla mahdollista saavuttaa betonin ilmamääräpotentiaali ja vähentää ilmamäärän kasvua kuljetuksen ja valun aikana.

Dynaamisen kimmokertoimen tulosten heittelemisestä huokostinta SikaAer Solid käytettäessä voi päätellä, että huokostimen valmiit ilmahuokokset eivät vaikuta betonin mikrorakenteeseen kemiallisesti, jolloin lisäaineettoman betonin hyvät ominaisuudet säilyvät vielä valun jälkeen. Yksi mahdollisuus on myös se, että betonin jatkuvasti hydratoituva sementti korjaa betonin mikrorakennetta ja vähentää sisäisten vaurioiden määrää vielä betonin ikääntyessä.

SikaAer Solid -huokostinta käytettäessä puristuslujuus kohosi jopa korkeammaksi kuin ilman huokostinta valetulla kappaleella. Tulos oli yllättävä, koska massan ilmamäärä oli suurempi kuin ilman huokostinta valetussa koekappaleessa. Päätelen odottamattoman lujuuden nousun johtuvan siitä, että akryylinitriilipolymeeri huokokset mahdollisesti omalta osaltaan tukevat betonin rakennetta ja esivalmistetut ilmahuokokset eivät vaikuta betonin lujuuteen samalla tavalla kuin betoniin muilla menetelmillä syntyvät huokokset.

SikaControl AER-200 P:tä käytettäessä puristuslujuustulokset jäivät alle tavoitearvojen. Mahdollisesti syy tämän huokostimen osalta on ollut korkeaksi noussut ilmamäärä ja liian suuri huokostimen annostelu. Lisäksi muiden huokostimien alhaiseen lujuudenkehitykseen voi oleellisesti vaikuttaa se, että koekappaleet on valettu eri aikaan ja eri henkilöiden toimesta kuin SikaAer Solidilla ja ilman huokostinta valmistetut massat.

Mielestäni tämän tutkimuksen tulokset uusista huokostimista vastaavat moniin huokostimiin liittyviin ongelmiin. Oikealla annostuksella ja huokostinten toimintaa lisää tutkimalla, on näistä huokostimista mahdollista saada erittäin toimivia ja varmoja. Tulokset olivat loogisia ja mielestäni mukailivat odotuksia.

Lähdeluettelo

Ahokas H. 2017. AVA – nopea ilmajakauman mittausmenetelmä. Semtu-uutiset 1/2017. PDF-tiedosto. Saatavissa: https://www.semtu.fi/application/files/9315/2189/4669/Semtu-uutiset_1-17_web.pdf [viitattu: 25.5.2020].

Janković, K., Stojanović, M., Bojović, D., Lončar, L. & Antić, L. 2017. The influence of air entraining admixtures on concrete properties. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.gf.uns.ac.rs/~zbornik/doc/NS2017.049.pdf> [viitattu: 29.2.2020].

Johansson, K. 2020. Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet: Betonilaborantin ja betonimyllärin pätevyitysmkurssi. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/nuoren-ja-kovettuneen-betonin-ominaisuudet-2020.pdf> [viitattu: 15.3.2020].

Leivo, M. 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen Osa 2.: Laadunvalvonta ja -varmistus. Espoo: VTT. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf> [viitattu 15.3.2020].

Mehta, P. & Montero, P. 2014. Concrete Microstructure: Properties and materials. 4. painos. New York: McGraw-Hill Education.

Mäkikyrö, T. 2017. Betonirakentamisen laatuketju kuntoon, taustalla vuoden 2016 lujuuskadot: Selvitysmiehen loppuraportti ja suositukset 14.11.2017. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://docplayer.fi/65485448-Betonirakentamisen-laatuketju-kuntoon-taustalla-vuoden-2016-lujuuskadot-selvitysmiehen-loppuraportti-ja-suositukset.html> [viitattu: 18.5.2020].

Punkki, J. 2017. Betonin ilmapitoisuuden hallinta: Betonin Kesäseminaari, Aulanko, 11.8.2017. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2017/08/Punkki.pdf> [viitattu 29.2.2020].

Punkki, J. 2017. Robust Air: Projektin lyhyt esittely. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/koulutus--ja-esitysaineistot/2017/kiertue/robust-air.pdf> [viitattu: 9.3.2020].

Suonketo, J.& Pentti, M. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tieto-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/ongelmia-ja-luuloja/> [viitattu: 15.3.2020].

SikaAir-PRO V5. 2013. Versio 03. Tietoesite. Ab Sika Finland Oy.

SikaControl® AER-200 P: Product data sheet. 2017. Versio 02.01. Sika Deutschland GmbH. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://deu.sika.com/content/dam/dms/deaddconst01/e/SikaControlAER-200P_en_DE_\(07-2017\)_2_1.pdf](https://deu.sika.com/content/dam/dms/deaddconst01/e/SikaControlAER-200P_en_DE_(07-2017)_2_1.pdf) [viitattu: 10.1.2020].

SikaAer® Solid: Product data sheet. Saatavilla valmistajalta

SFS-EN 12350-7. 2019. Testing fresh concrete. Part 7: Air content. Pressure methods.

SFS-EN 206. 2014. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus.

SFS-EN 12390-3. 2019. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens.

CEN/TS 12390-9 2016. 2016. Testing hardened concrete. Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts. Scaling

SFS 7022. 2019. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa.

Suomen Betoniyhdistys. 2016. BY65 Betoninormit 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Tepponen, P. 2018. Betonin huokostus. Semtu Oy.

Vuorinen, P. 2012. Betonointi kylmissä olosuhteissa. RTS. Rakennustieto Oy, AMK RKL ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK120603.pdf> [viitattu 15.3.2020].

Kumulatiivisesti mitattujen pintarapautumien tulokset

[g/m²]

Koekappaleen tunnus	Kierroksia 0	Kierroksia 7	Kierroksia 14	Kierroksia 28	Kierroksia 42	Kierroksia 56
1.1	0	5	9	11	11	15
1.2	0	3	5	7	9	12
1.3	0	3	4	6	8	10
1.4	0	3	4	6	7	9
SikaAir-PRO V5, keskiarvo	0	3,5	5,5	7,5	8,75	11,5
2.1	0	2	3	3	3	7
2.2	0	2	3	4	6	8
2.3	0	2	3	5	6	9
2.4	0	2	3	5	7	9
SikaControl® AER- 200 P, keskiarvo	0	2	3	4,25	5,5	8,25
3.1	0	3	4	6	8	10
3.2	0	4	6	9	11	14
3.3	0	2	3	5	8	10
3.4	0	5	7	10	12	15
SikaAer® Solid, keskiarvo	0	3,5	5	7,5	9,75	12,25

Tulokset ilman huokostusta (massa 4)

Kuution tunnus						
1	0	2	2	4	6	6
2	0	2	3	10	33	47
3	0	5	7	17	30	38
4	0	3	5	8	11	33
5	0	3	4	11	40	60
6	0	2	4	6	9	36
Ilman huokostinta keskiarvo	0,00	2,83	4,17	9,33	21,50	36,67

Dynaaminen kimmokerroin, tulokset

[%]

Koekappaleen tunnus	Kierroksia 0	Kierroksia 7	Kierroksia 14	Kierroksia 28	Kierroksia 42	Kierroksia 56
1.1	100	100	101	102	98	101
1.2	100	100	100	102	100	100
1.3	100	100	100	100	98	98
1.4	100	100	100	102	99	100
SikaAir-PRO V5, keskiarvo	100	100	100,25	101,5	98,75	99,75
2.1	100	100	102	103	100	100
2.2	100	100	101	104	99	102
2.3	100	100	100	103	100	103
2.4	100	100	101	103	100	101
SikaControl® AER-200 P, keskiarvo	100	100	101	103,25	99,75	101,5
3.1	100	100	101	104	101	101
3.2	100	100	100	103	103	103
3.3	100	100	100	100	103	103
3.4	100	100	100	104	106	106
SikaAer® Solid, keskiarvo	100	100	100,25	102,75	103,25	103,25

Tulokset ilman huokostusta (massa 4)

Kuution tunnus						
1	100	100	101	104	101	101
2	100	100	100	103	103	103
3	100	100	100	100	103	103
4	100	100	100	104	106	106
5	100	100	100	104	106	106
6	100	100	100	104	106	106
Ilman huokostinta keskiarvo	100	100	100,16667	103,16667	104,16667	104,16667

Tuoreen massan testaustulokset

Tuoreen massan testaustulokset

Massa1 SK C30/37 #16 S3 SikaAir® Pro Muuta: Referenssi- massa	Massa 2 SK C30/37 #16 S3 SikaControl® AER-200 P Muuta: -	Massa 3 SK C30/37 # 16 mm S3 SikaAer Solid Muuta: -
---	--	---

Pvm.	17.9.2019	17.9.2019	
Massa	Massa1	Massa2	Massa3
Koekappaleiden määrä [kpl]	8	8	8
Huokostimen määrä [%]	1,05	1,10	0,8
Lämpötila 1 [°C]	15,8	16	23
Lämpötila 2 [°C]	16,1	16,3	-
Märkätiheys [kg/m3]	2228,1	2275,5	2290
Painuma [mm]	200	190	200
AVA-mittaus [mm]	0,24	0,213	0,94
Ilmamäärä [%]	6,0	5,1	2,5

Muut huomiot

massa 1	Kuormakirjan nro 30550 Tiheys mitattuna 11,809 kg/5,3 l Käytetyn huokostimen määrä 7,54 kg Massan kokonaismäärä 2,51m3 Ei huomautettavaa
massa 2	Kuormakirjan nro 30551 Tiheys mitattuna 12,060 kg/5,3 l Käytetyn huokostimen määrä 7,20 kg Massan kokonaismäärä 2,48m3 Massa vaikutti referenssimassaa notkeamalta, vaikutti todellisuudessa ollut
massa 3	Kuormakirjan nro 30898 Käytetyn huokostimen määrä 8,72 kg Massan kokonaismäärä

Koekappaleiden puristuslujuudet

	SikaAir-PRO V5, keskiarvo		SikaControl® AER-200 P, keskiarvo		SikaAer® Solid, keskiarvo		Ilman huokostinta, keskiarvo
	1	2	1	2	1	2	1
7d [Mpa]	28,70	28,30	27,30	28,00	28,70	28,70	31,70
28d [Mpa]	28,80	28,70	28,20	28,20	41,80	38,60	41,30
tiheys 7d [kg/ m³]	2230	2210	2220	2220	2300	2240	2320
tiheys 28d [kg/ m3]	2240	2238	2231	2245	2290	2280	2323